管端スピニング加工に関する研究 (第1報)*

—加工現象に関する基礎的研究—

岡 村 俊 一** 田 中 秀 穂**

Studies on Tube-end Spinning (1st Report)

—On the Fundamental Experiment—

Shun'ichi OKAMURA, Hideho TANAKA

Experimental studies were carried out on copper tube formabilities of Tube-end Spinning. The purpose of this forming method is to get high reduction ratio for tube nose forming without external heating. In this operation, the tubular stocks are softened with frictional heat generated at interface between the surface of tubular stock and the revolving conical die which has longitudinal grooves. Those grooves play a role as a heat relief area at die innerface. The results obtained are as follows.

(1) The grooves provided at innerface of die as heat-relief area affect greatly the formabilities, the tubular stocks are nose formed repeating radial deflection in the grooves and undergoing alternating stresses of compression and tension in the tube material.

(2) Formed portion is recrystallized with frictional heat, the longer the forming time, the greater the growth of recrystallized grains.

(3) Spinning power is controlled by die revolution, feeding of tubular stock, and heat relief area ratio, spinning power is decreased with increase of heat-relief area and of die revolution, and is increased with increase of the feeding of tubular stock.

1. 緒 言

ここに、紹介する管端スピニング加工法は、管状片の端部を縮小成形、閉塞成形および拡大成形加工する目的で、管状片と同一軸線を回転軸として、高速回転するダイス(図1(a))を管状片端部に押付け、短時間に所定の形状に成形加工する方法であって、主として、米国で経験的に実用化されたものである。この加工法は、一般のスエーピング加工等と異なり、1) 冷間で大きな変形能が期待できる、2) 加工材料は、強度の大きい冷間加工材をそのまま使用することができる、3) 外部から加熱する必要もなく、また、加工にあたり過大な衝撃、振動等を伴わない、4) 回転摩擦熱を利用することで、加工中の熱影響を加工部に限定できる、など多くの特長をもつため、米国においては第2次大戦中、ロケット砲弾の大量生産に利用され、戦後は、冷凍機部品のドライヤ、ストレーナなどの製造加工に利用されている。この加工法では、回転摩擦熱による焼きつき防止と、摩擦熱を有効に利用するためにダイスの内壁面に沿って、いわゆる

heat-relief のためのみぞが設けられており、このみぞの役割等については、特許公報¹⁾にわずかにみられる程度で、本加工法についてのまとまった解析の報告等は皆無といってよい。

そこで、筆者らは、本加工法についての実験的な解析を行い、1) 加工条件と変形能の関係、2) heat-relief の役割をもつといわれる、ダイス内壁のみぞの有意性、3) 加工中の温度上昇による変形抵抗の変化など、製造技術に必要な基礎的研究を行うとともに、回転成形加工に共通する摩擦熱と変形抵抗の変化、局所的なひずみ速度の変化などの影響を明らかにして力学的解析を試みる一連の研究実験を行ったので報告するものである。

2. 実験装置および方法

2.1 使用機械器具および測定器具

1) 実験に使用した機械は高速精密旋盤(桐生機械製LE型750, 5PS)でその工具台を取りはずし、その上に自製の動力計を取付け、動ひずみ計(新興通信工業製DS6-RT型)にて加工中のトルク、送り方向のスラストを測定し、それを直立式電磁オシログラフ(横河電機製EMO-62型)に記録せしめた。図1(b)に加工装置および自製動力計を示す。

2) 温度測定は図1(b)中に示すように、銅管の内側

* 原稿受付 昭和51年9月18日。精機学会 高速度塑性加工分科会(昭和42年2月4日、5月20日)および精機学会九州支部講演会(昭和42年11月17日)にて発表。

** 正 会 員 鹿児島大学工学部(鹿児島市郡元1-21-40)

図1 ダイス形状および加工装置

図2 顕微鏡組織観察位置

に 0.4 mm° のアルメルクロメル熱電対をばねで固定し、同一円周上の3点を同時に電磁オシロに記録させ、その最高温度を採用した。なお、本加工法のように加工中の急激な温度変化がある場合の接触型の熱電対による測温方式は、追従性がわるく加工中の瞬間温度の正確な値を知ることは困難であり、あらかじめ熱電対自身の時間おくれについては校正し、なるべく相互の温度変化は比較できるように努めたものの、測定値はずいぶん低目に測定されていると考えられ、絶対値を知るには不正確であるので、本報では参考程度にとどめることにする。

3) 顕微鏡組織の観察には、加工された銅管を長手方向に切断し、その断面を電解研磨後、図2に示すように、加工部の3か所をその先端より I, II, III と観察し、粒度測定には比較法²⁾を採用し、その平均結晶粒度 $\bar{a}(\text{mm})$ を用いた。

2.2 供試銅管

試料として用いた銅管は、表1に示すとおりで、所定の寸法に切断後、端面仕上ののち、トリクレン洗浄を施してある。

2.3 使用ダイス

使用ダイスは、表1の諸元の円錐ダイス(図1(a))で、その内壁面に円錐母線に沿って、深さ約 $2\sim 0.7\text{ mm}$ のみぞを2個互いに対称の位置に配し、みぞの形状は、後

表1 実験条件

a) 供試銅管	
品 種	りん脱酸銅管第1種硬質
成 分	Cu 99.94%, P 0.012% 以下
寸法 (mm)	外径 管厚 長さ $\phi 19.05 \times 0.6 \times 48$
硬 度	92 H_R (F)
b) 使用ダイス	
材 質	SKD 4
頂角 $2\alpha^\circ$	30, 45, 60
みぞ面積比 A_r (%)	12.5, 25, 50, 75
c) 加工条件	
ダイス回転数 N_D (rpm)	1 220, 1 930, 3 000
送り f_w (mm/rev)	0.1, 0.23, 0.5

述の3.1.2節のC型で、みぞの大きさは、ダイス内壁の全面積 A に対するみぞの面積 A' の面積比 $A_r = A'/A \times 100\%$ で表した。

2.4 加工条件

表1に示すとおり、3種類のダイス回転数 N_D (rpm) の各々に対し、管の送り f_w (mm/rev) を3段階に変化させ、その各々に対し、4段階のみぞ面積比 A_r (%), 3種類のダイス頂角 2α の計12個のダイスを組合わせ、 $\phi 19.05$ の銅管を成形部先端の外径 $\phi 10$ (絞り比 $K=0.52$ に相当) に円錐状に口絞りを行う場合について実験を行ったが、成形部先端外径を正確に $\phi 10$ になるように加工終点を一致できないので、それぞれの実験値の比較には、絞り比 $K=0.62$ ($K=D/D_0$, D_0 : 素管の外径, D : 成形部先端の外径) における測定値を採用した。また、ダイス回転数、送りの選定にあたっては、他の条件(ダイス頂角、みぞ面積比)との組合せにより、成形可能な範囲内で、機械の出力を勘案しながら実用的に採用しうる条件として選択した。

3. 実験結果および考察

3.1 ダイス内壁に設けたみぞの有定性

本加工法の特長の一つにあげられる、ダイス内壁に設けるみぞは、加工抵抗、加工部組織など、加工性に与える影響が大で、且つ今後本加工法の解析の上に、このみぞの加工中における作用を解明することが必要である。当初、試料管とダイス内壁面との焼きつき防止の目的で設けたといわれるみぞが、その形状、数によって、加工部が正しい円錐状に成形されず、多角錐状に絞られたり、星形に絞られるような現象がでてくる(図3)。このみぞは単に、heat-reliefの役割だけでなく、管材は、みぞ内において連続的な繰返したわみを生じ、円周方向

図3 不良成形品

の交番応力をうけながら加工されると考えられ、みぞの形状、数によって変形様相が異なるためと解釈できる。そこで、成形加工中の管材のみぞ部付近での変位の状態、管材内部に生ずる応力変化などより、みぞの形状、数が加工性に与える影響を調べてみる。

3.1.1 みぞによる管材内部の交番応力および変位

あらかじめ、成形部先端の外径を約 $\phi 12$ に円錐状に絞った銅管の内壁面に、円周方向に沿って2か所、対称にひずみゲージをはり、これを対称に配置された2個のみぞ($A_r=50\%$)をもつダイスに軽く押付け、ゆっくりとダイスを回転させ、1回転中に生ずる銅管内部の円周方向の応力変化(ひずみで表した)を調べたのが図4である。これから、銅管はみぞつきダイスの回転により、みぞ数に対応した圧縮と引張りの交番応力をうけながら加工されると考えられる。図中、I, IIIの期間は、みぞ部における銅管内部の応力変化で、II, IVの期間は、ダイス壁面との接触期間の応力変化である。このことから、銅管は同図(c)に示すように、ダイスみぞ内で弾性的な盛上がり変位 u をうけながら加工されると推察できる。

3.1.2 みぞ形状が加工性に及ぼす影響

みぞの形状が、加工性に及ぼす影響を調べるために、みぞの形を図5(a)に示すようにA型(みぞ中心に対し

て対称であるが、みぞ端部をR加工してない)、B型(非対称で、みぞ端部を片方のみR加工してある)、C型(対称に、両端部ともR加工してある)の3種類に加工し、その各々のみぞをもつダイスで、3.1.1節ののべたと同様、銅管を軽く押付け、実際に機械を低速回転して、弾性的変形を起こさせたときの応力を調べたのが同図(b)で、また、これらの応力変化より推定されるみぞ内での銅管の変位は同図(c)に示すように、みぞの形によりその変位の形が異なる。すなわち、A, C型みぞのダイスでは、 $e/e_0=0.43$, B型のみぞでは $e/e_0=0.33$ となり、A, C型の対称型みぞのダイスでは、変位の頂点はほぼみぞの中心と見なしうが、B型の非対称型みぞでは、変位の頂点のずれが同図(a)に示す①の方に大きく偏った形の変位をなす。このために、加工材は実際の加工の場合は、みぞ内で屈曲され、図3(a)に示されるように、正しい円錐状とならず、多角錐状に絞られるものと考えられる。

表2は、A, B, C型のみぞのダイスにより表中に示す条件で加工したときの成形状態の良否をまとめたもので、A型のみぞのダイスによる成形部は後端にばかりが多く、みぞ端部②で削られた跡があり、一般に加工表面がきつない。B型みぞのダイスによる成形部は、図3(a)に示されるように正しい円錐状とならず、前述のみぞ内における変位の頂点のずれに起因すると考えられる多角錐状を呈し、製品としては使えない。C型のみぞのダイスによる成形部は、表2のいずれの条件でも良好な成形部が得られ、したがって、ダイスに設けるみぞはC型のものが適当であると考えられる。

3.1.3 みぞ数が加工性に及ぼす影響

本加工法においては、みぞ数も加工状態、成形部の良否に大きく影響するので、みぞ数2個および4個のダイス($A_r=50\%$, C型みぞ)を用い、加工性に与える影響を調べた。表3より、みぞ数4個のダイスで加工する場合、送りの大きい条件では、図3(b)に示したように加工部は星形状を呈するので、みぞ数2個のときに比べ送りを小さくしなければならないことがわかる。みぞ数が多くなると、ダイス内壁の円周方向に沿ったみぞ相互の間隔が短くなるため、ダイス壁面による管材の接触拘束長さ減少により、容易に管材は、みぞ内で曲げをうけるので、みぞ内での管材のたわみ角 θ (図4(c)参照)も大きくなり、円周方向に

図4 加工材内部の応力変化(円周方向)とみぞ内での変位

図5 みぞ形状および管材内部の応力変化（円周方向）と加工材のみぞ内での変位

表2 みぞ形状による成形状態の良否

ダイス回転数 ND (rpm)		1 220			1 930			3 000		
送り f_w (mm/rev)	みぞ形状	f_w (mm/rev)			f_w (mm/rev)			f_w (mm/rev)		
		0.1	0.23	0.5	0.1	0.23	0.5	0.1	0.23	0.5
	A 型	※	○	○	※	※	○	○	○	○
	B 型	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	C 型	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎：正しく円錐状態に絞られ良好，○：ばりを成形部後端に生ずるが製品としては使える，※：加工表面がある，×：多角形状に絞られ製品としては不適
 $A_r=50\%$ ，みぞ数=2

表3 みぞ数による成形状態の良否

ダイス回転数 ND (rpm)		1 220					1 930					3 000				
送り f_w (mm/rev)	みぞ数	f_w (mm/rev)					f_w (mm/rev)					f_w (mm/rev)				
		0.045	0.07	0.1	0.23	0.5	0.045	0.07	0.1	0.23	0.5	0.045	0.07	0.1	0.23	0.5
	2	—	—	○	○	○	—	—	○	○	○	—	—	○	○	○
	4	○	○	○	×	×	○	○	○	×	×	○	○	○	×	×

○：正しく円錐状態に絞られ良好，×：星形に絞られ製品としては不適，—：実施しなかった条件
 $A_r=50\%$ ，C型みぞ

歪屈を生じたものと考えてよい。なお、この現象は A_r の小さい 12.5%、25% のときはほとんど現れず、 $A_r=50\%$ 、75% と大きくなるほど現れやすい。

図6は、管材のみぞ内での変位から、加工におけるみぞ内での平均ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_i$ の変化を示したものである。すなわち、

$$\dot{\epsilon}_i = (u/l)/S \quad (\text{s}^{-1}) \quad (1)$$

ここで、 u ：みぞ内での変位 (mm) (図4)， l ：みぞ幅 (mm) (図4)， S ：管材のみぞ内の通過時間 (s)。

同図にて明かなように、みぞ数4個の場合は、2個の場合に比べて $\dot{\epsilon}_i$ が大きい。一方、みぞ数を多くする

と、円周方向におけるダイス壁面と管材の接触長さ減少により、管材は、ダイス壁面より浮上がりを繰り返し円周方向にいわゆる波打現象を生じ、実際には接触面積が減少するため加工部温度が下がり、みぞ内での $\dot{\epsilon}_i$ の増加と相まって、変形抵抗を増大させることになり、延性値の低い材料においては、破断の原因となることも考えられる。ゆえにみぞ数を多くする場合、さらに送りを小さくし、加工部温度を上げる必要があるが、ダイス回転数、送りの適当な選定とともに、円周方向におけるダイス壁と管材の接触時間も考慮に入れて、発生熱の蓄積による管材の軟化に十分なだけの接触時間をもつようにみぞ幅、みぞ数を決定しなければならないものと考えられる。

3.2 加工部の組織変化

本加工法のように、冷間加工にはじまり、

熱間加工に終わると見なされる加工現象は、成形部における組織変化をもたらす。これは、成形後の製品の機械的性質をかえることになるので、成形加工中の温度は適切でなければならない。この温度を制御する要因としては、ダイス回転数、管の送り、ダイスのみぞ面積比があげられる。

図7に、これらの要因と成形部の組織変化の関係を示す。本実験に用いた銅管は、冷間引抜き管であるため、素管の組織は引抜き方向の繊維状組織を呈していたのが (同図(e))、加工をうけ、いずれも再結晶組織を呈し、成形部は熱間塑性域にあったことがわかる (同図(a))、

$N_D = 760 \text{ rpm}$, $2\alpha = 60^\circ$, $A_r = 50\%$, みぞ形状: C型

図6 みぞ内における加工材の平均ひずみ速度 $\bar{v}_c$.

(b), (c), (d)). 送りのおそい, ダイス回転数の大きい条件では, 加工中の温度分布のため, 成形部後端 III より先端部 I の方に結晶粒 (平均粒径 $\bar{a}$ で示す) は大きくなり (同図 (a)), 先端部 I の方が加工時の熱影響の大きかったことがわかる. 一方, 送りの大きい条件では, 加工時間が短いので, 成形部の温度差によるこの傾向は, はっきり認められないが, 逆に, 先端部 I の方が粒度の小くなる場合もでてくる. 同図 (b), (c), (d) は, みぞ面積比, 送り, ダイス回転数の変化による粒度の差異を成形部先端 I の組織について示す. 再結晶粒度は, ダイス回転数の増加とともに大きくなり (No. 10, 11, 12), 送りの増加とともに小さくなり (No. 7, 8, 9), また, みぞ面積比の増加とともに小さくなる (No. 1, 4, 5, 6). これは, よく知られるところの再結晶粒成長の温度依存性³⁾, および加工度依存性³⁾を示すもので, 本加工法の特質ともいうべきものであり, この結晶粒度の差異はダイス回転数の増加が, 成形部の温度を上昇させ, 送りの増加は, ダイス 1 回転あたりの加工量を大きくし, みぞ面積比の増加は, 温度をやや下げるが, みぞ端部でのしごき量を大きくするなどのためと考えられる.

再結晶粒度の温度依存性は, 図 8 の (a), (b) にても明らかに示す温度変化と同じ傾向を示し, また, 管材の円周方向のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_\theta$ を式 (2) で求めて, 再結晶粒度を対比してみると, ひずみ速度依存性も明らかである.

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{f_w(N_D/60)\tan\alpha}{(D_o/2) - f_w(N_D/60)\tan\alpha \cdot S} \quad (2)$$

ここで, N_D : ダイス回転数 (rpm), f_w : 送り (mm/rev), α : ダイス半角 (度), D_o : 素管外径 (mm), S : 加工時間 (s).

同図に示すごとく, 成形中におけるひずみ速度の変化の少ない条件 ($f_w = 0.1 \text{ mm/rev}$) に比べ, 変化の大きい条件 ($f_w = 0.5 \text{ mm/rev}$) では, 再結晶粒度は加工部先端へ小さくなり, ひずみ速度分布に応じた粒度分布が示される.

3.3 加工抵抗

3.3.1 トルクおよびスラスト

本加工法における加工抵抗としては, ダイス内壁面と管材との回転摩擦によるトルク T および押込み力としてのスラスト T_h があげられる.

図 9 に, 絞り比 $K = 0.62$ のときの各加工条件と加工抵抗の関係の一例を示す.

ダイス回転数 N_D の増加につれ, トルク, スラストともに減少する (同図 (a)). これは, N_D の増加は, 管材の昇温による変形抵抗の減少をもたらすと同時に, 摩擦圧接時に生ずる摩擦状態の変化⁴⁾に類似して, 摩擦係数の低下も一因と考えられる. しかし, このダイス回転数によるトルク, スラストへの影響は, 温度上昇の大きくなる条件 (送りが小さく, みぞ面積比の小さい) ほど大きく, この傾向は, ダイス頂角の変化によっても変わらない.

送り f_w と加工抵抗の関係は, 同図 (b) にみられるように N_D の場合と逆な関係を示し, f_w を大きくすることは, 成形部温度を下げるると同時に 1 回転あたりの加工量を増加させるため, トルク, スラストともに大きくなる. 送りの変化に対しては, トルクよりもスラストへの影響が大で, この傾向は, ダイス頂角が大きくなるとさらに大きくなる.

みぞ面積比 A_r の増加に対しては, トルク, スラストともに減少し, $A_r = 75\%$ と大きくなると, ダイス回転数の影響がなくなる (同図 (c)). この A_r 増加に対する加工抵抗の減少は, いままでのべたダイス回転数, 送りの変化に対する成形温度および加工度の相関性で一義的に説明はできず, もう少し詳細な検討が必要と考えられるが, 一つには, 接触面圧が A_r の増加で大きくなり, 管材は変形を受けやすくなると同時に, 摩擦係数が小さくなり⁵⁾, さらに, ダイスと管材の接触面積減少による摩擦抵抗が小さくなるためと考えられ, 一つには, 変形様相が回転摩擦仕事から, しごき仕事主体にかわるためと考えられる.

図8 加工条件と結晶粒度の変化

図9 加工条件と加工抵抗の関係

図10 所要動力中に占める L_θ の割合

時間の長いほど、再結晶粒の成長が認められる。

(4) 加工抵抗は、ダイス回転数および、みぞ面積比の増加につれ小さくなり、送りの増加につれ大きくなる。

(5) 所要動力は、そのほとんどがトルクによって占められ、スラストによる動力は無視してよいほど小さい。

本実験の一部は昭和42年度文部省科研費にて行われたものである。

なお、本実験に協力された本学の中西賢二助手に多大の謝意を表する次第である。

文 献

- 1) W.P.Hill: 米国特許公報 Apr-41944 2313474 など。
- 2) ASTM: ASTM Standards on Copper and Copper Alloys, (1952).
- 3) 例えば、関口春次郎編: 金属の塑性加工と変質, 誠文堂新光社 (1963) 409~411.
- 4) 中村俊一: 摩擦圧接法 (I), 精密機械, 30, 8 (1964) 604.
- 5) 中村俊一: 摩擦圧接法, 日本機械学会誌, 69, 564 (1966) 53.